



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

UNIVERSIDADE DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA

**MODELAÇÃO DO CRESCIMENTO
EM ALTURA E DA RELAÇÃO
DIÂMETRO-ALTURA DE ÁRVORES
JOVENS DE *Quercus suber***

Francisco Manuel de Carvalho Braga

Orientadora: Doutora Joana Amaral Paulo

Co-Orientadora: Professora Doutora Maria Margarida

Branco de Brito Tavares Tomé

Mestrado em Gestão e Conservação dos Recursos Naturais

Dissertação

Évora, 2015



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

UNIVERSIDADE DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA

MODELAÇÃO DO CRESCIMENTO

EM ALTURA E DA RELAÇÃO

DIÂMETRO-ALTURA DE ÁRVORES

JOVENS DE *Quercus suber*

Francisco Manuel de Carvalho Braga

Orientadora: Doutora Joana Amaral Paulo

Co-Orientadora: Professora Doutora Maria Margarida

Branco de Brito Tavares Tomé

Mestrado em Gestão e Conservação dos Recursos Naturais

Dissertação

Évora, 2015

Aos meus pais, à minha esposa e ao meu filho

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado só foi possível graças à colaboração e ao contributo de várias pessoas, às quais deixo algumas palavras de agradecimento e profundo reconhecimento.

Aos meus pais, dirijo um agradecimento especial, pelo amor, carinho e por todo o apoio que me deram ao longo da minha vida.

À minha esposa Mafalda, pela paciência e grande disponibilidade em ajudar direta ou indiretamente a cumprir os objetivos da presente tese e a realizar mais uma etapa da minha formação académica. Agradeço as palavras de incentivo, compreensão e encorajamento, durante todo este período.

À minha avó Maria, pelo amor e carinho, com que sempre me tratou e que faleceu durante o decorrer desta tese, as minhas eternas saudades!

À Doutora Joana Amaral Paulo, minha orientadora, por todo o apoio, partilha do saber, disponibilidade, apoio e incentivo constantes, durante a execução da tese. Agradeço-lhe ainda os comentários, as sugestões e a análise crítica, prestados durante a execução desta tese. A minha gratidão e profundo reconhecimento.

À Professora doutora Margarida Tomé, minha co-orientadora, pela transmissão de conhecimentos, por toda a disponibilidade demonstrada e revisão deste trabalho.

Ao engenheiro Alberto Azevedo Gomes, do Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, por todo o apoio concedido na análise de solos, onde se realizou a instalação das parcelas permanentes.

À Associação de Produtores Florestais de Coruche (APFC), à Associação de Produtores Florestais de Ponte de Sôr (AFLOSOR) e ao vice-presidente da ANEFA, Eng.º Filipe Roque, pela disponibilidade demonstrada na facilitação dos contactos com os proprietários dos povoamentos onde se realizou a instalação das parcelas permanentes.

Ao Diogo Castelo Branco, pela disponibilidade e cedência dos dados obtidos na realização do inventário florestal do decurso da sua tese de mestrado.

Esta tese teve ainda o apoio dos seguintes projetos:

- Contrato de pós doutoramento SFRH / BPD / 96475 / 2013, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, sobre o tema: ‘Research on cork and pine-nut production in agrosilvopastoral systems, towards an efficient use of resources in water restricted ecosystems’. Esta tese inclui-se no âmbito das tarefas 1 e 3 do referido plano de trabalhos.
- Projeto PTDC / AGR-FOR / 4360 / 2012, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, sobre o tema ‘Cork carbon footprint: from trees to products’.
- Projeto StarTree, financiado pelo European Union’s Seventh Programme for research, technological development and demonstration, under grant agreement No. 311919.

Resumo

O objetivo desta tese foi a modelação do crescimento em altura do sobreiro na fase de regeneração e da relação diâmetro-altura na fase juvenil.

Os dados utilizados foram provenientes de medições realizadas em povoamentos puros localizados nos concelhos de Coruche, Estremoz, Ponte de Sôr, Sines, Évora, Idanha-a-Nova e Castelo Branco. Os povoamentos foram caracterizados no que diz respeito a solo, clima e variáveis do povoamento.

Foram ajustadas duas funções: uma função de crescimento da altura total na fase de regeneração e uma função de predição do diâmetro, ambas ao nível da árvore individual. Em ambos os casos foram selecionadas as funções que apresentavam melhor prestação por comparação de diversas estatísticas de ajustamento e capacidade preditiva (precisão e enviesamento).

A regra definida para a diferenciação das fases de regeneração e juvenil aplicada no modelo SUBER, baseada numa combinação de valores de altura total e diâmetro à altura do peito, foi discutida com base nos valores encontrados no conjunto de dados recolhidos.

Palavras-chave: modelação; sobreiro; altura total; relação diâmetro-altura; regeneração

Abstract - Modelling height and diameter growth of young *Quercus* *suber* trees

The objective of the present work was the modeling height growth in the regeneration stage and diameter growth in juvenile stage of the cork oak species.

The data used were obtained from measurements performed on permanent plots installed in pure cork oak stands, located on the municipalities of Coruche, Estremoz, Ponte de Sôr, Sines, Évora, Idanha-a-Nova and Castelo Branco. The stands were characterized for soil type, climate and stand variables.

Two tree-level functions were adjusted: one for total height growth in the regeneration stage and other for the diameter prediction. In both cases the functions selected were the ones presenting best performance through comparison of several fitting and prediction ability statistics (precision and bias).

The rule established for the definition of the regeneration and juvenile phases applied in the SUBER model, based on a combination of values of total height and diameter at breast height, was discussed based on the values presented in the data set of the present work.

Keywords: modelling; cork oak; total height; diameter-height relationship; regeneration

Índice

| | |
|---|------------|
| Agradecimentos..... | i |
| Resumo | iii |
| Abstract | iv |
| Índice de figuras..... | vi |
| Índice de tabelas..... | vii |
| 1. Introdução | 1 |
| 2. Dados | 5 |
| 2.1. <i>Localização geográfica e acessibilidade</i> | 5 |
| 2.2. <i>Caracterização biofísica.....</i> | 6 |
| 2.3. <i>Caracterização edafoclimática</i> | 8 |
| 3. Materiais e métodos | 13 |
| 3.1. <i>Instalação e medição das parcelas permanentes</i> | 13 |
| 3.2. <i>Caracterização dos povoamentos.....</i> | 14 |
| 3.3. <i>Modelação do crescimento anual em altura total da árvore na fase de regeneração</i> | 15 |
| 3.4. <i>Modelação da relação diâmetro-altura.....</i> | 19 |
| 3.5. <i>Validação das funções</i> | 20 |
| 4. Resultados e discussão | 22 |
| 4.1. <i>Caracterização do conjunto de dados: definição das fases de regeneração e juvenil das árvores</i> | 22 |
| 4.2. <i>Modelação do crescimento anual em altura total da árvore na fase de regeneração</i> | 24 |
| 4.3. <i>Modelação da relação diâmetro-altura.....</i> | 27 |
| 5. Conclusão | 32 |
| 6. Bibliografia..... | 34 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Esquema do módulo da fase de regeneração do modelo SUBER de acordo com a definição aplicada na versão v5.0..... | 3 |
| Figura 2 – Localização geográfica dos povoamentos jovens de sobreiro onde foram realizadas medições. | 5 |
| Figura 3 – Exemplo de um dos perfis de solo em estudo..... | 10 |
| Figura 4 – Povoamento de sobreiro jovem em estudo. | 14 |
| Figura 5 – Relação entre a altura total e o diâmetro à altura do peito das árvores no conjunto de dados.. | 23 |
| Figura 6 – Relação dos resíduos <i>studentizados</i> em função dos valores estimados de altura total..... | 26 |
| Figura 7 – Resíduos <i>studentizados</i> da altura total em papel normal de probabilidade.. | 26 |
| Figura 8 – Relação dos resíduos <i>studentizados</i> em função dos valores estimados de diâmetro à altura do peito..... | 29 |
| Figura 9 – Resíduos <i>studentizados</i> do diâmetro à altura do peito em papel normal de probabilidade. | 29 |
| Figura 10 – Resíduos <i>studentizados</i> da relação diâmetro-altura em papel normal de probabilidade, obtidos pelo ajustamento com recurso ao método de Huber..... | 31 |

Índice de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Concelho e número de parcelas amostradas neste trabalho. | 6 |
| Tabela 2 – Caracterização dos povoamentos em estudo. | 7 |
| Tabela 3 – Caracterização climática dos povoamentos em estudo. | 9 |
| Tabela 4 – Caracterização pedológica dos povoamentos em estudo. | 11 |
| Tabela 5 – Funções de crescimento sob a forma de crescimento potencial <i>versus</i> modificador utilizadas na modelação do crescimento em altura nos povoamentos jovens de sobreiro. | 17 |
| Tabela 6 – Caracterização dos povoamentos em estudo. | 22 |
| Tabela 7 – Estatísticas de ajustamento com as diversas variáveis independentes testadas. | 24 |
| Tabela 8 – Valores dos parâmetros e estatísticas associadas à significância da função final para a modelação da altura. | 25 |
| Tabela 9 – Estatísticas de validação da função selecionada para a modelação da altura no ano t_2 com base na função definida como potencial <i>versus</i> modificador. | 25 |
| Tabela 10 – Estatísticas de ajustamento e capacidade preditiva da função linear para o crescimento da relação diâmetro-altura. | 27 |
| Tabela 11 – Estatísticas de ajustamento da função para a relação diâmetro-altura expressas como combinações lineares de várias variáveis independentes. | 27 |
| Tabela 12 – Valores dos parâmetros e estatísticas associadas à significância da função final para a modelação da relação diâmetro-altura. | 28 |
| Tabela 13 – Estatísticas de validação da função selecionada para a modelação da relação diâmetro-altura. | 28 |
| Tabela 14 – Valores dos parâmetros e estatísticas associadas à significância da função final para a modelação da relação diâmetro-altura, após aplicação do método de Huber. | 30 |
| Tabela 15 – Estatísticas de validação da função selecionada para a modelação da relação diâmetro-altura, após aplicação do método de Huber. | 30 |
| Tabela 16 – Funções selecionadas para a modelação do crescimento em altura e relação diâmetro-altura. | 33 |

1. Introdução

A importância económica dos povoamentos suberícolas em Portugal é conhecida e reconhecida, não se limitando à produção de cortiça. Estas áreas são igualmente produtoras de outros produtos comercializáveis como lenha, cogumelos, bolota. Enquanto sistemas multifuncionais dão origem a uma importante quantidade de outros bens e serviços como o armazenamento de carbono, proteção do solo ou manutenção da biodiversidade (Coelho *et al.*, 2012; Aronson *et al.*, 2009).

A área ocupada por esta espécie em Portugal tem vindo a aumentar desde a publicação da Carta da Distribuição Nacional do Sobreiro em 1960. Ocupa atualmente em Portugal 715.922 hectares de povoamentos adultos (puros, mistos dominantes e plantações jovens), correspondendo a 23 % da área florestal do país (AFN, 2010). Nos últimos 20 anos são responsáveis por este aumento os novos povoamentos florestais com sobreiro, instalados maioritariamente recorrendo a incentivos financeiros públicos ao abrigo de vários programas de florestação inseridos na política agrícola da União Europeia, nomeadamente no âmbito das ações de florestação de terras consideradas marginais para a agricultura. Estes programas compreenderam a arborização de novas áreas, a rearborização de áreas ardidadas e a beneficiação de povoamentos florestais existentes, na maioria dos casos por operações de adensamento.

Na prática da gestão florestal sustentável é útil a realização de simulações do crescimento e produtividade futura, tanto de novas plantações como de povoamentos adultos existentes. Tal permite simular a evolução dos povoamentos geridos segundo diferentes alternativas de gestão. Um modelo de crescimento e produção tem como objetivo a previsão da evolução de um povoamento tendo em conta as diversas alternativas de gestão, sendo considerado uma ferramenta de apoio para a gestão florestal. Este é uma abstração da dinâmica de um povoamento florestal, podendo englobar o crescimento de diversas variáveis, a mortalidade ou quaisquer outras alterações na composição e estrutura do povoamento (Tomé, 2011).

Os primeiros trabalhos referentes ao desenvolvimento de um modelo de crescimento e produção para o montado de sobreiro em Portugal iniciaram-se no final da década de 90, e resultaram na primeira versão do modelo designado por SUBER (Tomé *et al.*, 1998, 1999). Este é classificado como um modelo de crescimento e produção, baseado na simulação da árvore individual, e para o crescimento é do tipo independente da

distância. Este modelo permite, a partir de dados recolhidos em inventário florestal, simular o crescimento e a produção de cortiça virgem, cortiça amadia, biomassa e carbono de um dado povoamento, assim como outras variáveis do povoamento (Paulo, 2011). A versão atual do modelo apresentada por Paulo (2011) está implementada na plataforma para modelos da floresta sIMfLOR (Faías *et al.*, 2012) disponível em www.isa.ulisboa.pt/cef/forchange/fctools.

O objetivo da presente tese é contribuir para o melhoramento do módulo designado por fase de regeneração incluído no modelo SUBER (Figura 1). Este módulo pretende incluir não só uma função para o crescimento em altura ao nível da árvore individual, bem como outro para a relação diâmetro-altura a aplicar quando as árvores se encontram na transição entre a fase de regeneração e a fase juvenil. No modelo SUBER, a fase de regeneração estende-se desde o início do crescimento da árvore até ao momento em que a medição ou simulação do diâmetro à altura do peito é viável do ponto de vista da realização de um inventário florestal. Este ponto é designado como o momento de transição entre a fase de regeneração e a fase juvenil. Se antes de atingir a altura total de 1.3 m a variável diâmetro é, por definição, igual a zero, quando a altura total é ligeiramente superior é frequente a medição não ser realizada devido à conformação arbustiva da planta. Na versão atual do modelo SUBER o início da fase juvenil ocorre quando a árvore ultrapassa os 3 m de altura total ou o valor do diâmetro medido sobre cortiça virgem é igual ou superior a 2.5 cm. Esta definição garante a compatibilidade com o modelo de crescimento em diâmetro (Tomé *et al.*, 2006) e a relação hipsométrica (Paulo *et al.*, 2011) existentes no modelo SUBER, que são aplicados na simulação do crescimento das árvores nas fases juvenil e adulta. O conjunto de dados recolhidos e disponíveis para este trabalho, permitiu visitar e discutir a adequabilidade deste limite de diferenciação das fases de regeneração e juvenil.

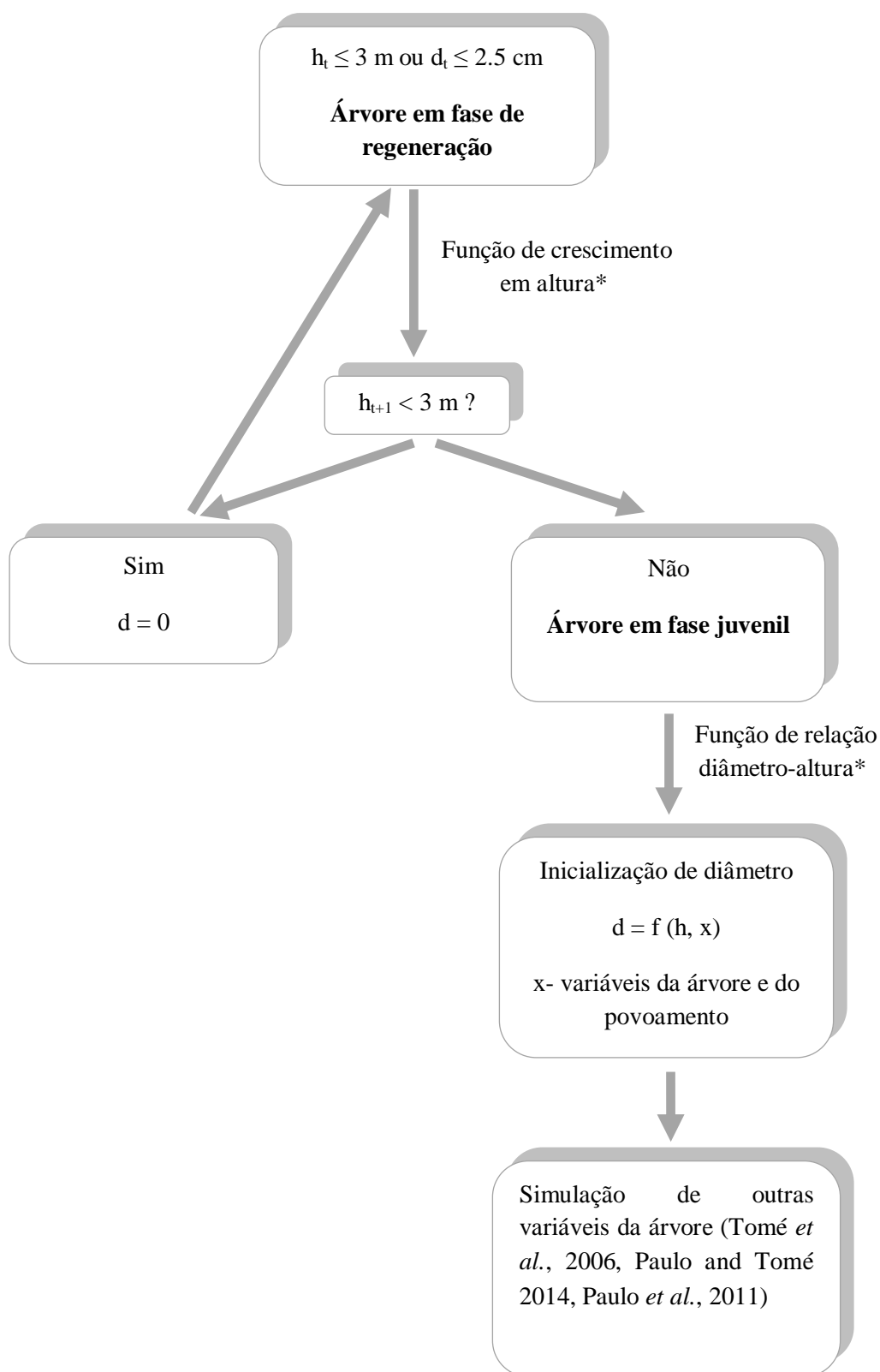


Figura 1 – Esquema do módulo da fase de regeneração do modelo SUBER de acordo com a definição aplicada na versão v5.0 (Paulo, 2011).

*funções a desenvolver nesta tese.

h_t – altura total da árvore no ano t (m), d_t – diâmetro à altura do peito com cortiça no ano t (cm), h_{t+1} – altura total da árvore no ano $t+1$ (m), f – função de, h – altura (m), x – variáveis da árvore e do povoamento

2. Dados

2.1. Localização geográfica e acessibilidade

Os povoamentos de sobreiro amostrados estão localizados ao longo da área de distribuição do sobreiro em Portugal, nos concelhos de Coruche, Castelo Branco, Estremoz, Évora, Idanha-a-Nova, Ponte de Sôr e Sines (Figura 2). O acesso às áreas onde foram realizadas as medições foi feito por estradas florestais que se dispersam no interior de cada propriedade e permitem em geral uma boa acessibilidade.

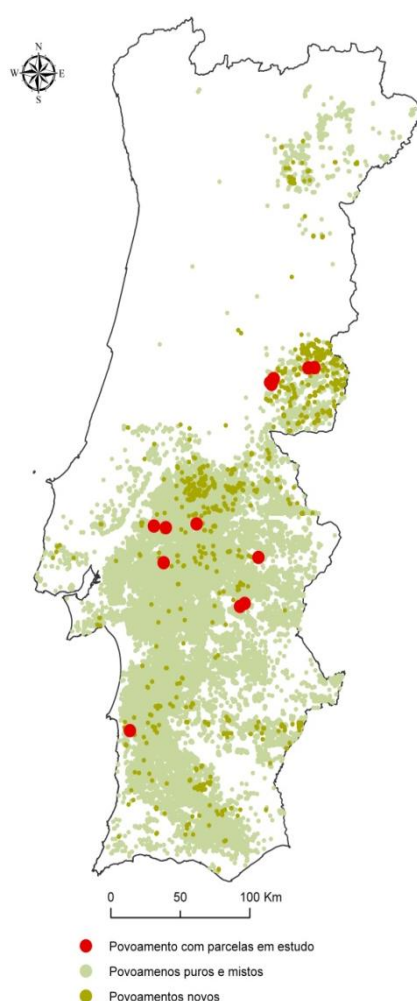


Figura 2 – Localização geográfica dos povoamentos jovens de sobreiro onde foram realizadas medições (AFN, 2010).

Na Tabela 1, além da indicação do concelho onde os povoamentos se localizam encontra-se o número de parcelas amostradas em cada caso e a fonte de recolha dos dados utilizados. Por motivos de confidencialidade em relação aos proprietários que facultaram o acesso aos seus povoamentos, estes não são designados pelo seu nome. Os povoamentos e as parcelas instaladas são antes referenciados através do código utilizado na base de dados designada SUBERDATA, da responsabilidade do grupo de investigação FORCHANGE do Centro de Estudos Florestais do Instituto Superior de Agronomia, onde os dados se encontram inseridos. Todos os códigos iniciam-se pelo algarismo 3, e a restante leitura deve ser feita da seguinte forma:

2º a 4º dígitos – código do povoamento

5º a 7º dígitos – código da parcela do povoamento

Exemplos:

- 3011002 – Parcela número 2 do povoamento 11
- 3015002 – Parcela número 2 do povoamento 15

Tabela 1 – Concelho e número de parcelas amostradas neste trabalho.

| Povoamento | Número de parcelas | Concelho | Fonte |
|-------------|--------------------|----------------|--------------------------------------|
| 3001 - 3009 | 14 | Coruche | Serrano (2007) |
| 3010 | 1 | Estremoz | Projeto de investigação CarbWoodCork |
| 3011 - 3012 | 5 | Sines | Projeto de investigação CarbWoodCork |
| 3013-3014 | 3 | Ponte de Sôr | Nesta tese |
| 3015 - 3016 | 6 | Évora | Nesta tese |
| 3017 - 3019 | 6 | Castelo Branco | Castel-Branco (2014) |
| 3020 - 3021 | 3 | Idanha-a-Nova | Castel-Branco (2014) |

2.2. Caracterização biofísica

Todos os povoamentos onde foram marcadas parcelas para recolha de dados são de composição pura, originários de plantações de idade conhecida e na altura das medições não tinham ainda sido sujeitos a desbóia (todas as árvores apresentam cortiça virgem). A Tabela 2 apresenta a caracterização das parcelas em estudo no que refere às seguintes

variáveis: concelho, ano de instalação, compasso, altitude e número da carta militar onde a parcela está inserida.

Tabela 2 – Caracterização dos povoamentos em estudo.

| Código Parcela | Concelho | Ano de instalação | Compasso (m) | Densidade à plantação (n.º árvores/ha) | Altitude (m) | Carta militar |
|----------------|----------------|-------------------|--------------|--|--------------|---------------|
| 3001001 | Coruche | 2000 | 8x4 | 313 | 150 | 379 |
| 3001002 | | | | | | |
| 3002001 | | 2001 | 6x4 | 417 | 150 | |
| 3002002 | | | | | | |
| 3003001 | Coruche | 1994 | 4x2 | 1250 | 105 | 407 |
| 3003002 | | | | | 106 | |
| 3004001 | | | | | 109 | |
| 3004002 | | | | | 108 | |
| 3005001 | | | | | 108 | |
| 3005002 | | | | | 110 | |
| 3006001 | Coruche | 1998 | 6x2 | 833 | 99 | 378 |
| 3006002 | | | | | | |
| 3007001 | | | | | | |
| 3007002 | | | | | | |
| 3010001 | Estremoz | 1998 | 6x3 | 556 | 335 | 411 |
| 3011001 | Sines | 1992 | 4x8 | 313 | 125 | 526 |
| 3011002 | | | | | 125 | |
| 3011003 | | | | | 125 | |
| 3012001 | | | | | 153 | |
| 3012002 | | | | | 153 | |
| 3013001 | Ponte de Sôr | 1999 | 7x3 | 476 | 174 | 367 |
| 3014001 | Ponte de Sôr | 2001 | 8x2.5 | 500 | 106 | 380 |
| 3014002 | | | | | | |
| 3015001 | Évora | 2004 | 6x3.5 | 476 | 251 | 449 |
| 3016001 | Évora | 1999 | 6x3.5 | 476 | 258 | 450 |
| 3016002 | | | | | 261 | |
| 3016003 | | | | | 260 | |
| 3016004 | | | | | 253 | |
| 3016005 | | | | | 263 | |
| 3017001 | Castelo Branco | 1994 | 9x2 | 556 | 387 | 268 |
| 3017002 | | | | | 387 | |
| 3017003 | | | | | 395 | |
| 3017004 | | | | | 392 | |

Tabela 2 – Caracterização dos povoamentos em estudo (continuação).

| Código Parcela | Concelho | Ano de instalação | Compasso | Densidade à plantação (n.º árvores/ha) | Altitude | Carta militar |
|-----------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|---|-----------------|----------------------|
| 3018001 | Castelo Branco | 1995 | 7x2.5 | 571 | 401 | 268 |
| 3019001 | Castelo Branco | 1995 | 5x3 | 667 | 406 | 268 |
| 3020001 | Idanha-a-Nova | 2006 | 5.5x2.5 | 727 | 356 | 258 |
| 3021001 3021002 | Idanha-a-Nova | 2006 | 6x2.5 5x2.5 | 667 800 | 425 | 258 |

2.3. Caracterização edafoclimática

Para a apreciação da variação dos elementos meteorológicos e udométricos nos diferentes povoamentos foram considerados os valores das normais climatológicas do período de 1970 a 1999, referentes à estação meteorológica mais próxima de cada povoamento entre as que compõem a rede de estações meteorológicas do Instituto de Meteorologia. Para a obtenção dos dados recorreu-se à aplicação disponível na página FcTools em: <http://www.isa.ulisboa.pt/cef/forchange/fctools/pt/ferramentas/normaisclimatologicas6090>, que após o fornecimento da lista de coordenadas dos povoamentos, fornece um ficheiro Excel com valores médios das diferentes variáveis.

Dado o elevado número de variáveis disponíveis nas normais climatológicas, são apenas apresentadas na Tabela 3 as que são consideradas mais importantes para a sobrevivência e desenvolvimento do sobreiro: temperatura do ar, precipitação, humidade relativa do ar, evapotranspiração e número de dias com geada. Nesta tabela apresentam-se os valores da temperatura média anual, média mínima anual, média máxima anual, precipitação média anual, evapotranspiração média e número de dias com geada para os povoamentos inventariados.

Tabela 3 – Caracterização climática dos povoamentos em estudo.

| Pov. | EM | Conc. | TMA (°C) | TMmA (°C) | TMMA (°C) | PMA (mm) | HMR (%) | EMM (mm) | NDG |
|-------------|-----------------------|----------------|----------|-----------|-----------|----------|---------|----------|------|
| 3001 - 3007 | Coruche | Coruche | 15.9 | 9.4 | 22.4 | 641.7 | 56.3 | 100.4 | 18.3 |
| 3010 | Vila Fernando | Estremoz | 15.4 | 9.8 | 21.1 | 590.1 | 62.2 | 117.2 | 25.1 |
| 3011 - 3012 | Sines | Sines | 15.7 | 13.2 | 18.3 | 493.3 | 76.9 | 78.2 | 0.1 |
| 3013 - 3014 | Mora | Ponte de Sôr | 16.0 | 10.1 | 21.9 | 617.2 | 63.8 | 134.2 | 30.2 |
| 3015 - 3016 | Évora | Évora | 15.7 | 10.9 | 20.5 | 624.8 | 52.5 | 159.8 | 8.1 |
| 3017 - 3019 | Fundão | Castelo Branco | 14.1 | 8.5 | 19.7 | 943.7 | 61.8 | 136.8 | 33.4 |
| 3020 - 3021 | Termas de Monfortinho | Idanha-a-Nova | 15.4 | 9.1 | 21.8 | 632.4 | 52.1 | 152.9 | 29.3 |

Pov. – povoamento; EM – estação meteorológica; Conc. – concelho; TMA – temperatura média anual (°C); TMmA – temperatura média mínima anual (°C); TMMA – temperatura média máxima anual (°C); PMA – precipitação média anual (mm); HMR – humidade média relativa (%); EMM – evapotranspiração média mensal (mm); NDG – número de dias com geada.

De acordo com a classificação de Oliveira (1998) verificamos que os povoamentos se encontram em zonas de clima temperado, uma vez que a temperatura média anual do ar se encontra acima dos 10°C e abaixo dos 20°C. De acordo com Alves (1988), os valores ótimos de temperatura média anual para a distribuição do sobreiro estarão entre 15°C e 19°C, sendo que as temperaturas mínimas de Inverno não deverão descer abaixo de -5°C. Desta forma, apenas os povoamentos localizados no concelho de Castelo Branco se encontram ligeiramente fora deste intervalo, sem que isto no entanto seja considerado relevante para o desenvolvimento das árvores. Dos valores da Tabela 3 verifica-se também que é o povoamento que está localizado no concelho do Fundão, aquele que apresenta uma temperatura média mínima anual mais baixa, quando comparado com os restantes povoamentos.

Para todos os povoamentos, à exceção dos localizados no concelho de Castelo Branco e Sines, o valor da precipitação média anual ronda os 600 mm, encontrando-se portanto

no intervalo de 600 a 800 mm considerado por Natividade (1950) como sendo o ideal para o desenvolvimento do sobreiro. Não se encontram povoamentos em locais com valores de precipitação inferiores a 400 mm, referidos por Natividade (1950) como fora da gama de valores preferenciais para o desenvolvimento do sobreiro.

Com base na abertura dos perfis do solo (Figura 3) foi possível caracterizar o solo de 38 parcelas, embora em algumas delas não se tenham analisado todos os parâmetros, nomeadamente a espessura útil do solo e a profundidade da rocha mãe, pela impossibilidade de recorrer à abertura de perfil que implicou, em alternativa, a amostragem com sonda de solos.



Figura 3 – Exemplo de um dos perfis de solo em estudo.

Na Tabela 4 encontra-se a caracterização dos solos presentes nos povoamentos amostrados no que diz respeito às seguintes variáveis: litologia, classificação internacional segundo World Reference Base for Soil Resources (IUSS Working Group WRB 2006), espessura útil do solo, profundidade da rocha mãe e textura do solo. Esta

tabela demonstra que o conjunto dos povoamentos amostrados reúne uma grande diversidade pedológica.

Tabela 4 – Caracterização pedológica dos povoamentos em estudo.

| Parcela | Litologia | Classificação FAO | Espessura útil solo (cm) | Profundidade rocha mãe (cm) | Textura solo |
|---------|------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| 3001001 | ag-c | Arenossolos | * | * | AF |
| 3001002 | | | * | * | AF |
| 3002001 | | | * | * | AF |
| 3002002 | | | * | * | AF |
| 3003001 | | | 90 | 90 | A |
| 3003002 | | | 65 | 120 | AF |
| 3004001 | ag-pc | Cambissolos | 110 | 110 | AF |
| 3004002 | af-nc | | 90 | 90 | AF |
| 3005001 | ap-pc | Arenossolos | 135 | 135 | AF |
| 3005002 | af-nc | | 110 | 110 | A |
| 3006001 | ag-pc | Cambissolos | 50 | 120 | AF |
| 3006002 | | | 52 | 88,5 | AF |
| 3007001 | | | 50 | 100 | FA |
| 3007002 | | | 70 | 150 | FA |
| 3010001 | fd/xstPAPR | Luvissolos | 120 | 104 | FG |
| 3011001 | cscranhas | Luvissolos | 50 | 110 | FG |
| 3011002 | | | 135 | 105 | FG |
| 3011003 | | | 85 | 85 | F |
| 3012001 | | | 115 | 115 | FG |
| 3012002 | | | 110 | 110 | FG |
| 3013001 | af-nc | Arenossolos | 192 | 140 | A |
| 3014001 | Calcário | Luvissolos | * | 45 | FG |
| 3014002 | | | * | 120 | FG |
| 3015001 | Xistos | Luvissolos | * | * | F |
| 3016001 | Granito | Luvissolos | * | * | FA |
| 3016002 | | | * | * | FGA |
| 3016003 | | | * | * | AF |
| 3016004 | | | * | * | FGA |
| 3016005 | | | * | * | AF |
| 3017001 | Granito | Cambissolos | 130 | 130 | FGA |
| 3017002 | | | 60 | 60 | FGA |
| 3017003 | | | * | * | FGA |
| 3017004 | | | 45 | 45 | FGA |
| 3018001 | | | 75 | 75 | FA |
| 3019001 | Granito | Leptossolos | 20 | 20 | AF |
| 3020001 | Xistos | Leptossolos | 50 | 50 | FA |

Tabela 4 – Caracterização pedológica dos povoamentos em estudo (continuação).

| Parcela | Litologia | Classificação FAO | Espessura útil solo (cm) | Profundidade rocha mãe (cm) | Textura solo |
|---------|-----------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| 3021001 | Granito | Cambissolos | 85 | 85 | AF |
| 3021002 | | | 70 | 70 | AF |

* informação não disponível

ag-c – arenito de grão grosseiro, consolidados; ag-pc – arenitos de grão grosseiro, pouco consolidado; cscranhas - depósitos de formações detríticas de quartzo e quartzito cimentadas por materiais ferrosos, sobre xisto avermelhado do carbónico; af-nc – arenito de grão fino, não consolidado; ap-pc – arenitos pedregosos, pouco consolidados; fd/xstPAPRE - depósitos de formações detríticas de quartzo e dioritos sobre xistos do paleozóico e precâmbrico indiferenciados; FG – franco-argiloso; A – arenoso; F – franco; FA – franco-arenoso; FGA – franco-argilo-arenoso; AF – arenoso-franco

3. Materiais e métodos

3.1. Instalação e medição das parcelas permanentes

A instalação das parcelas permanentes foi realizada com o apoio de carta militar e de fotografia aérea. A localização das parcelas dentro de cada povoamento foi definida por forma a considerar a variabilidade do povoamento em termos de topografia, solo e consequentemente em produtividade.

As parcelas foram instaladas de forma quadrangular e rectangular, com uma área de 2000 m², utilizando fitas métricas e prismas de espelhos. Em cada parcela, todas as árvores da plantação foram numeradas (Figura 4). Dado o tamanho reduzido das árvores, estas foram identificadas com uma chapa de metal. Em algumas parcelas, a chapa de identificação foi apenas colocada nas árvores numeradas com número par. Foram recolhidas as coordenadas geográficas da primeira árvore de cada parcela com recurso a GPS.

Foi efetuado o registo das informações referentes às operações culturais aplicadas desde o momento da plantação, com particular interesse nas que poderiam influenciar o desenvolvimento do crescimento em altura das árvores. Embora alguns povoamentos tenham sido instalados recorrendo a protetores de plantas, assumiu-se que estes não afetam o crescimento em altura nas idades em que os povoamentos foram medidos: maior ou igual a 6 anos. A gestão do subcoberto dos povoamentos foi semelhante, com remoção de mato recorrendo a corta matos com uma periodicidade que varia entre 3 a 5 anos de intervalo dependendo do seu desenvolvimento. Em nenhum dos povoamentos foi aplicado qualquer tipo de adubo ou instalada qualquer pastagem. Nenhum dos povoamentos tinha sido desbastado antes do momento das medições, pelo que o número de árvores por hectare contabilizado se refere às árvores plantadas, reduzidas das árvores mortas desde o momento da plantação (Castel-Branco 2014).



Figura 4 – Povoamento de sobreiro jovem em estudo.

O perímetro à altura do peito (1.30 m de altura) foi medido perpendicularmente ao eixo vertical da árvore com o auxílio de uma fita de diâmetros, sendo posteriormente convertido em diâmetro. Quando a árvore se encontrava localizada num terreno com alguma inclinação, a determinação do nível de 1.30 m no tronco foi feita a partir do ponto mais elevado do solo.

A determinação da altura na árvore individual foi realizada recorrendo à vara telescópica. A leitura foi realizada diretamente na graduação marcada na vara.

3.2. Caracterização dos povoamentos

Todos os povoamentos foram caracterizados, em cada uma das medições, quanto às seguintes variáveis: área basal, diâmetro mínimo, médio e máximo, diâmetro dominante, número de árvores por hectare, diâmetro quadrático médio, altura média, altura mínima, altura máxima, altura dominante e índice de qualidade da estação. O

diâmetro quadrático médio de um povoamento é definido como o diâmetro correspondente à árvore de área basal média.

A vitalidade e a produtividade das espécies florestais dependem, da qualidade da estação, bem como de fatores genéticos e dos sistemas de gestão. O conceito de qualidade da estação é complexo porque envolve vários fatores, entre os quais se destacam as condições climáticas, a fisiografia e as propriedades e qualidade do solo (Alves *et al.*, 2012; Paulo *et al.*, 2015). O índice de qualidade da estação foi estimado com base nas curvas de classe de qualidade desenvolvidas para Espanha por Sánchez-González *et al.* (2005), considerando uma idade padrão de 80 anos. Estas curvas mostram um comportamento adequado para a simulação do crescimento em altura dominante dos povoamentos de sobreiro em Portugal (Ruiz, 2005). A equação que representa estas curvas necessita da medida da altura dominante a uma idade conhecida. Esta foi obtida através das medições realizadas, considerando como árvores dominantes as vinte e cinco árvores mais grossas por hectare.

3.3. Modelação do crescimento anual em altura total da árvore na fase de regeneração

As medições da altura das árvores foram feitas com intervalos de 3, 4 ou 6 anos. Pretendendo-se desenvolver uma função para o crescimento num período de um ano houve a necessidade de calcular o crescimento anual correspondente. Neste cálculo assumiu-se que o crescimento foi linear no período entre medições. Desta forma as funções apresentadas não entram em linha de conta com possíveis diferenças de crescimento entre anos consecutivos originados, por exemplo, por variações anuais de clima. Outros métodos alternativos são apresentados na literatura (Nunes *et al.*, 2011), no entanto optou-se nesta tese por aceitar o crescimento anual linear para o período entre medições, uma vez que as árvores se encontram numa fase de regeneração, onde a curva de crescimento se traduz numa fase linear. O cálculo da altura no ano $t+1$ foi assim definido por:

$$h_{t+1} = h_t + (h_{t+3} - h_t)/n,$$

onde:

h_{t+1} – altura total da árvore após um ano de crescimento;

h_t – altura total no ano t ;

h_{t+3} – altura total da árvore após três anos de crescimento.

n - intervalo de tempo entre medições (anos)

Uma fase essencial na elaboração de modelos de produção é a seleção de funções de crescimento para a modelação do crescimento e produção das árvores e povoamentos (Tomé, 2011). As funções de crescimento dividem-se em funções empíricas (modelos empíricos) e analíticas ou funcionais (modelos funcionais ou de base biológica). As funções de crescimento analíticas obtêm-se geralmente sob a forma diferencial a partir do estabelecimento de uma hipótese sobre as taxas de crescimento absoluta ou relativa, resultando a expressão para a produção por integração (Tomé, 2011).

Para a modelação do crescimento em altura foi considerado o método crescimento potencial *versus* modificador (Burckhart & Tomé, 2012). O método das equações às diferenças também foi considerado numa fase inicial do trabalho, aplicado às funções Lundqvist, Richards e Monomolecular (Burckhart & Tomé, 2012). Os resultados da aplicação deste método mostraram que a função Lundqvist-Korf-K era a que apresentava melhores resultados, no entanto, verificaram-se algumas deficiências no comportamento da função final. Um dos aspetos observados foi o de que o valor estimado para a assíntota da função era consideravelmente mais baixo do que o valor da assíntota da função proposta por Paulo *et al.* (2011) para o valor da altura da árvore, considerando árvores com um diâmetro mínimo de 2.5 cm até árvores adultas. Do ponto de vista do crescimento da árvore, não é expectável que a assíntota varie pelo facto de a árvore estar na fase de regeneração (a modelar no presente trabalho), na fase juvenil ou na fase adulta, e desta forma o método não foi considerado para o desenvolvimento da função para a altura total da árvore em fase de regeneração.

O método designado por modelação do crescimento potencial *versus* função modificadora admite que o crescimento potencial num povoamento é traduzido pelo crescimento das árvores dominantes do povoamento. No que diz respeito ao crescimento das árvores não dominantes considera-se que este é reduzido devido a características do povoamento, da árvore, ou à competição a que esta está sujeita. Esta característica é incorporada na função pela multiplicação do crescimento dominante por uma função modificadora, que varia entre os valores 0 e 1 e tem expressa nos seus

parâmetros uma combinação de variáveis da árvore, do povoamento ou índices de competição. Quando a função se aproxima de 1 a árvore em questão aproxima-se do crescimento dominante, e quando se aproxima de 0 traduz o crescimento de árvores dominadas. Mais detalhes sobre este método podem ser encontrados em Burkhart and Tomé (2012).

Neste trabalho foram utilizadas duas funções modificadores alternativas, sendo o crescimento em altura expresso como uma função que multiplica o crescimento potencial (altura dominante) por um fator de ajuste competitivo (o modificador) limitado entre 0 e 1. As funções testadas como funções modificadoras (Sánchez-González *et al*, 2006) foram as que se encontram na Tabela 5, referindo-se a aplicação do método à modelação do acréscimo em altura no ano 2 em função da altura no ano 1.

Tabela 5 – Funções de crescimento sob a forma de crescimento potencial *versus* modificador utilizadas na modelação do crescimento em altura nos povoamentos jovens de sobreiro.

| Função de crescimento potencial <i>versus</i> modificador |
|--|
| $h_2 = h_1 + ((h_{dom2} - h_{dom1})/int) * (1/(1 + \exp(-(a_0 + a_1 * var))))$ |
| $h_2 = h_1 + ((h_{dom2} - h_{dom1})/int) * (1 - \exp(-(a_0 + a_1 * var))))$ |
| h_1 – altura total da árvore no momento do ano $t = 1$; h_2 – altura total da árvore no momento do ano $t = 2$; h_{dom1} - altura dominante (m) da árvore no momento no ano $t = 1$; h_{dom2} - altura dominante (m) da árvore no momento no ano $t = 2$; int – intervalo de tempo entre medições (anos); a_0 , a_1 – parâmetros; var – variável independente testada. |

Nas funções apresentadas na tabela anterior foram testadas, na forma linear, as seguintes variáveis:

- altura dominante (h_{dom});
- índice de qualidade da estação (SI);
- número de árvores por hectare (N);
- índice de competição altura total / altura dominante (h_t/h_{dom}).

É de salientar que o diâmetro à altura do peito não foi considerado como variável a testar nos parâmetros da função, já que a fase de regeneração é caracterizada pelo facto de as árvores terem valores de altura total que não permitem a medição do diâmetro à

altura do peito. Também não foram usadas variáveis do clima e do solo, por se admitir que a variável índice de qualidade da estação já permite testar a significância das características do solo e do clima para o desenvolvimento do povoamento.

As funções testadas foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados não lineares, recorrendo ao algoritmo Gauss-Newton, usando os procedimentos PROC NLIN e PROC MODEL do programa SAS 9.2 (SAS 1989). A função selecionada foi a que apresentou maior valor de eficiência de modelação (valor mais próximo de 1) e menor erro quadrático médio. Simultaneamente, foi considerado o sinal dos parâmetros associados a cada uma das variáveis, por forma a garantir a sua correta interpretação no que diz respeito ao significado biológico das variáveis a que estão associados.

Após a definição da função final, foram averiguadas as hipóteses da homocedasticidade (variância residual constante quando observada em função dos valores estimados) e da normalidade dos resíduos, a primeira por análise do gráfico dos resíduos *studentizados* em função dos valores estimados, e a segunda por análise do gráfico dos resíduos em papel normal de probabilidade ou *qq-plot* (Myers, 1990).

No caso de se comprovar a não normalidade dos resíduos da função ajustada, deve ser utilizada uma alternativa ao procedimento dos mínimos quadrados (Myers, 1990). Nesse caso, foi seguido o método proposto por Myers (1990), no qual se define uma função de influência aplicada a cada observação, com base no resíduo que ela produz aquando o ajustamento. A função de influência é geralmente escolhida de maneira a que sejam atribuídos baixos pesos de influência a observações associadas a grandes resíduos após o ajustamento. Utilizou-se a função de influência proposta por Huber (1973), a qual é dada por:

$$\Psi(e_i) = e_i \text{ se } |e_i| \leq r;$$

$$\Psi(e_i) = r \text{ se } e_i > r;$$

$$\Psi(e_i) = -r \text{ se } e_i < -r.$$

onde:

- e_i são os resíduos *studentizados*;

- r é um valor real.

De acordo com o recomendado por Myers (1990), no presente ajustamento definiu-se $r = 2$.

3.4. Modelação da relação diâmetro-altura

Para a modelação da relação diâmetro-altura foi utilizado o conjunto de dados disponíveis, sendo excluídas das medições, as árvores que apresentavam medição de diâmetro inexistente em consequência da altura total ser inferior a 1.30 m.

A função considerada, após observação gráfica da relação entre as duas variáveis a modelar, foi a função linear restringida a passar no ponto (1.3,0). Esta restrição garante que o valor do diâmetro estimado para a altura do peito é 0 quando a altura da árvore é igual a 1.3 m. A forma da função linear pode ser representada por:

$$d = b (h - 1.3),$$

onde:

d - o diâmetro à altura do peito (cm);

h - a altura total da árvore (m);

b - parâmetro da função a estimar.

Foi testada a expressão do parâmetro b em função das seguintes variáveis:

- número de árvores por hectare (N);
- índice de qualidade da estação (SI).

Procedeu-se então ao ajustamento da função considerando dois conjuntos de dados diferentes:

- Conjunto total dos dados ($n = 3441$);
- Conjunto de dados restritos a alturas entre os 1.5 m e os 3 m ($n = 1211$).

O interesse do ajustamento da função ao segundo conjunto de dados prende-se com a importância de avaliar o comportamento da função para a gama de valores a ser utilizada. Uma vez que a função em questão será aplicada para estimar o diâmetro no

momento em que este atinge valores próximos de 2.5 cm (valor a partir do qual os sobreiros são medidos no inventário florestal nacional), procuraram-se definir os valores de altura correspondentes a este diâmetro (Figura 5, na secção 4.1).

Também no desenvolvimento desta função foi avaliada a verificação das hipóteses da homocedasticidade e da normalidade dos resíduos. No caso de se comprovar a não normalidade dos resíduos da função ajustada, foi aplicado o método proposto por Myers (1990) descrito na secção anterior.

3.5. Validação das funções

A validação das funções é um passo essencial na sua construção (Soares *et al.* 1995; Vanclay, 1995). Dada a inexistência de um conjunto de dados independentes para esta fase do trabalho, a avaliação da capacidade preditiva de ambas as funções desenvolvidas neste trabalho recorreu à análise dos resíduos *press*. O resíduo *press* i corresponde a ajustar a função, retirando-se a i -ésima observação da série de dados e usando as restantes $(n - 1)$ observações para estimar os parâmetros da função. Com base na função obtida, é calculado o resíduo de predição relativo à observação retirada. Este processo é repetido sucessivamente para as n observações, obtendo-se assim os n resíduos *press* (Myers, 1990). Assim, os resíduos *press* são dados por:

$$e_{i,-i} = y_i - \hat{y}_{i,-i},$$

onde:

y_i - observação i ($i = 1, \dots, n$) da variável resposta da função de regressão;

$\hat{y}_{i,-i}$ - valor estimado pela função quando ajustada sem aquela observação.

Para validação das funções, foram calculadas as seguintes estatísticas para avaliar a eficiência da função, assim como o seu enviesamento e precisão:

- Eficiência de modelação (EF): expressa a percentagem de variância explicada pela função, sendo que o valor 1 indica um ajustamento “perfeito”, 0 que a função não será melhor do que uma simples média e valores negativos indicam uma função pobre.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_{i,-i}^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

- Média dos resíduos *press* (Mrp): expressa o enviesamento da função quando diversas observações são combinadas. A média dos resíduos *press* deve ser próxima de 0.

$$Mrp = \frac{\sum_{i=1}^n e_{i,-i}}{n}$$

- Média dos valores absolutos dos resíduos *press* (Marp): expressa a precisão da função ou o valor médio do erro associado a uma única previsão. A média do valor absoluto dos resíduos *press* deve ser pequena.

$$Marp = \frac{\sum_{i=1}^n |e_{i,-i}|}{n}$$

- Estatísticas descritivas de localização: percentis 95 (P95) e 5 (P5). Estes percentis indicam a grandeza e distribuição dos resíduos de predição.

4. Resultados e discussão

4.1. Caracterização do conjunto de dados: definição das fases de regeneração e juvenil das árvores

O conjunto de dados utilizado para a modelação do crescimento anual em altura e relação diâmetro-altura diz respeito a 38 parcelas medidas em 2007 e remedidas em 2010, 2011 e 2013, num total de 3070 observações. Foram eliminadas do conjunto de dados as árvores mortas entre a primeira e segunda medição. Na Tabela 6 apresenta-se a caracterização dos povoamentos em estudo, para a primeira e segunda medição dos povoamentos.

Tabela 6 – Caracterização dos povoamentos em estudo.

| Variável | 1ª medição | | | | 2ª medição | | | |
|------------|------------|------|------|------|------------|------|------|------|
| | min | méd | máx | DP | min | méd | máx | DP |
| h_t | 0.25 | 2.7 | 9.5 | 1.8 | 0.35 | 4.4 | 11 | 2.3 |
| d | 0 | 5.1 | 38 | 6.2 | 0 | 10.8 | 37.5 | 7.9 |
| N | 130 | 357 | 690 | 155 | 100 | 292 | 635 | 147 |
| G | 0 | 0.99 | 5.87 | 1.49 | 0.31 | 2.21 | 6.47 | 1.53 |
| dg | 0 | 4.6 | 15.9 | 3.7 | 5 | 9.7 | 14.1 | 2.4 |
| h_{dom} | 1.0 | 4.3 | 8.6 | 1.8 | 3.5 | 6.4 | 10.2 | 1.9 |
| du_{dom} | 0.5 | 8.9 | 22.6 | 6.3 | 4.9 | 15.2 | 29.4 | 6.9 |
| SI | 11.5 | 16.3 | 18.4 | 1.6 | 15.3 | 17.1 | 18.3 | 0.9 |

min – mínimo; méd – média; máx – máximo; DP – desvio padrão; h_t – altura total no ano t (m); d – diâmetro à altura do peito (cm), N – número de árvores por hectare; G – área basal do povoamento ($m^2 \cdot ha^{-1}$); dg – diâmetro quadrático médio (cm); h_{dom} – altura dominante (m); du_{dom} – diâmetro dominante (cm); SI – índice de qualidade da estação.

A Figura 5 mostra a relação entre as variáveis diâmetro à altura do peito e altura total encontrada nos povoamentos amostrados, demonstrando uma tendência linear.

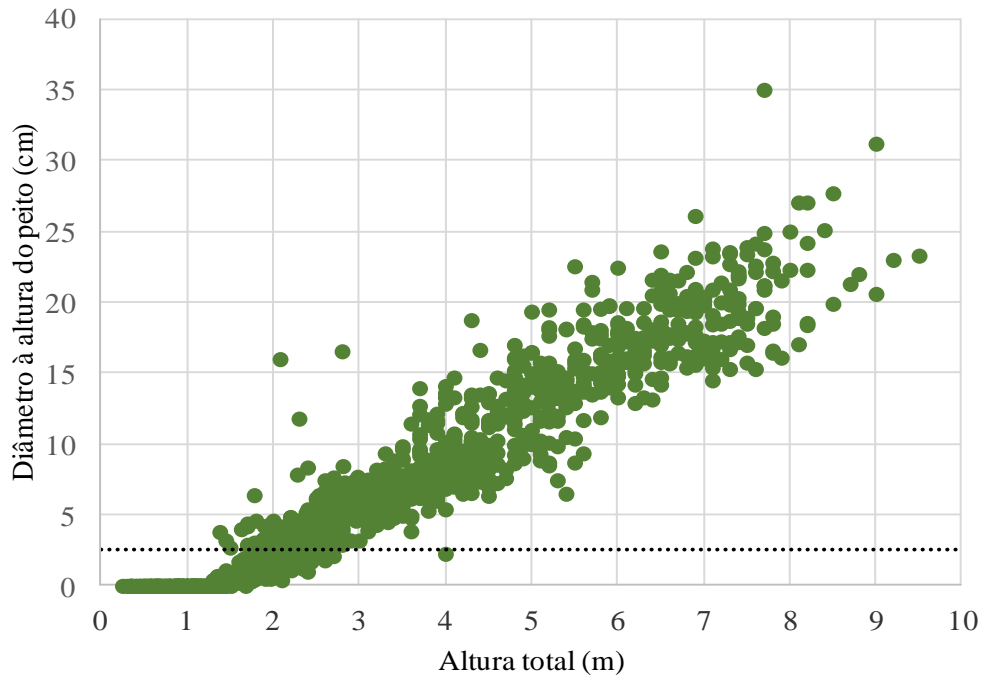


Figura 5 – Relação entre a altura total e o diâmetro à altura do peito das árvores no conjunto de dados. A linha a tracejado corresponde à reta horizontal $y = 2.5$.

Ao observar quais os valores de altura total que estão associados a valores nulos de diâmetro à altura do peito, verifica-se que se encontram até valores de 1.68 m de altura. Por outro lado, verifica-se que o valor de 2.5 cm em diâmetro à altura do peito está associado a valores de altura total da árvore que variam entre 1.50 e 2.70 m. Árvores com altura total igual a 3 m apresentam valores de diâmetro à altura do peito pertencentes à classe de diâmetro de 5 cm ou seja, valores entre 2.5 e 7.5 cm.

Tendo em conta estes resultados pode concluir-se que a regra de transição entre as fases de regeneração e juvenil do modelo SUBER é adequada. A fase de regeneração, inclui árvores com menos de 3 m de altura ou diâmetro à altura do peito inferior a 2.5 cm. Até atingir este valor de altura total o modelo SUBER apenas simula o crescimento em altura total com base na função desenvolvida no presente trabalho e a apresentar na secção que se segue. Quando a árvore ultrapassa o valor de 3 m de altura então é estimado o valor de diâmetro à altura do peito, utilizando para isso a segunda função também desenvolvida nesta tese e apresentada de seguida. Nesta altura a árvore passa para a fase juvenil.

4.2. Modelação do crescimento anual em altura total da árvore na fase de regeneração

De seguida (Tabela 7) apresentam-se as estatísticas de ajustamento obtidas para as funções alternativas para o crescimento em altura, formulados segundo a forma de potencial *versus* modificador.

Tabela 7 – Estatísticas de ajustamento com as diversas variáveis independentes testadas.

| Função | Variável | EF | MSE |
|--|-----------------------------------|-------|-------|
| $h_2 = h_1 + ((h_{dom_2} - h_{dom_1})/int) * (1/(1 + \exp(-(a_0 + a_1 * var))))$ | SI ₁ | 0.994 | 0.027 |
| | N ₁ | (*) | (*) |
| | hdom ₁ | (**) | (**) |
| | h ₁ /hdom ₁ | 0.994 | 0.025 |
| $h_2 = h_1 + ((h_{dom_2} - h_{dom_1})/int) * (1 - \exp(-(a_0 + a_1 * var))))$ | SI ₁ | 0.994 | 0.027 |
| | N ₁ | (*) | (*) |
| | hdom ₁ | (**) | (**) |
| | h ₁ /hdom ₁ | (**) | (**) |

EF – eficiência de modelação, MSE – Erro quadrático médio ou Mean Square Error; SI – índice de qualidade da estação (m) estimado no momento no ano t=1; N₁ – número de árvores vivas por hectare no momento no ano t=1; h₁ – altura total (m) da árvore no momento no ano t = 1; h₂ – altura total (m) da árvore no momento no ano t = 2; hdom₁ – altura dominante (m) da árvore no momento no ano t=1; hdom₂ - altura dominante (m) da árvore no momento no ano t=2; int – intervalo de tempo entre medições (anos); (*) – parâmetro a₁ não significativo; (**) – parâmetro a₀ não significativo.

Os resultados demonstraram um comportamento semelhante de ambas as funções formuladas com cada uma das funções modificadoras consideradas. Em ambos os casos, o número de árvores por hectare não foi significativo em nenhuma das formulações consideradas.

Entre as restantes variáveis testadas a que resultou num valor de erro quadrático médio inferior foi o índice de competição h₁/hdom₁. A função seleccionada foi a que incluía ambas as estimativas dos parâmetros a₀ e a₁ como significativas. Os valores dos parâmetros da função final e as estatísticas associadas à sua significância são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores dos parâmetros e estatísticas associadas à significância da função final para a modelação da altura.

| Parâmetro | Estimativa | Limite do intervalo de confiança a 95% | |
|-----------|------------|--|---------|
| a_0 | - 0.528 | - 0.947 | - 0.109 |
| a_1 | 4.527 | 3.517 | 5.537 |

a_0, a_1 - parâmetros

Os valores das estatísticas de validação obtidos com resíduos *press* para esta função encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Estatísticas de validação da função seleccionada para a modelação da altura no ano t_2 com base na função definida como potencial *versus* modificador.

| EF | Mpr | Mapr | p5 | p95 |
|-------|-------|-------|--------|-------|
| 0.994 | 0.008 | 0.122 | -0.237 | 0.260 |

EF – eficiência de modelação; Mpr – média dos resíduos *press*; Mapr – média dos valores absolutos dos resíduos *press*; p5 – percentil 5; p95 – percentil 95;

Na Figura 6 apresenta-se o gráfico dos resíduos *studentizados* em função dos valores estimados, que permitiu observar a existência de homocedasticidade nas estimativas da função.

Na Figura 7 apresenta-se o gráfico dos resíduos *studentizados* em papel normal de probabilidade ou *qq-plot*, que permitiu verificar a condição referente à normalidade dos resíduos produzidos pela função (Myers, 1990).

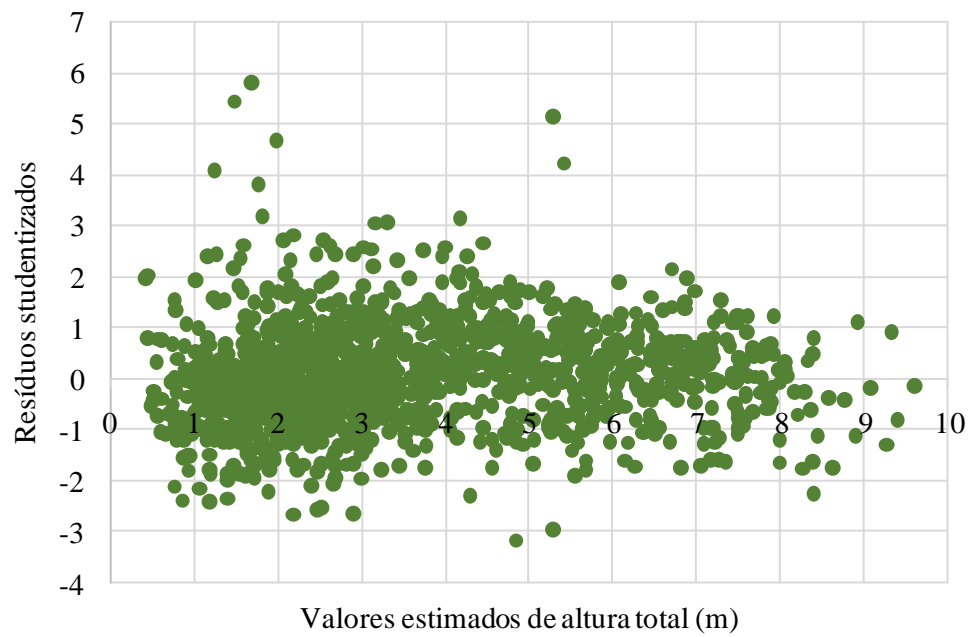


Figura 6 – Relação dos resíduos *studentizados* em função dos valores estimados de altura total.

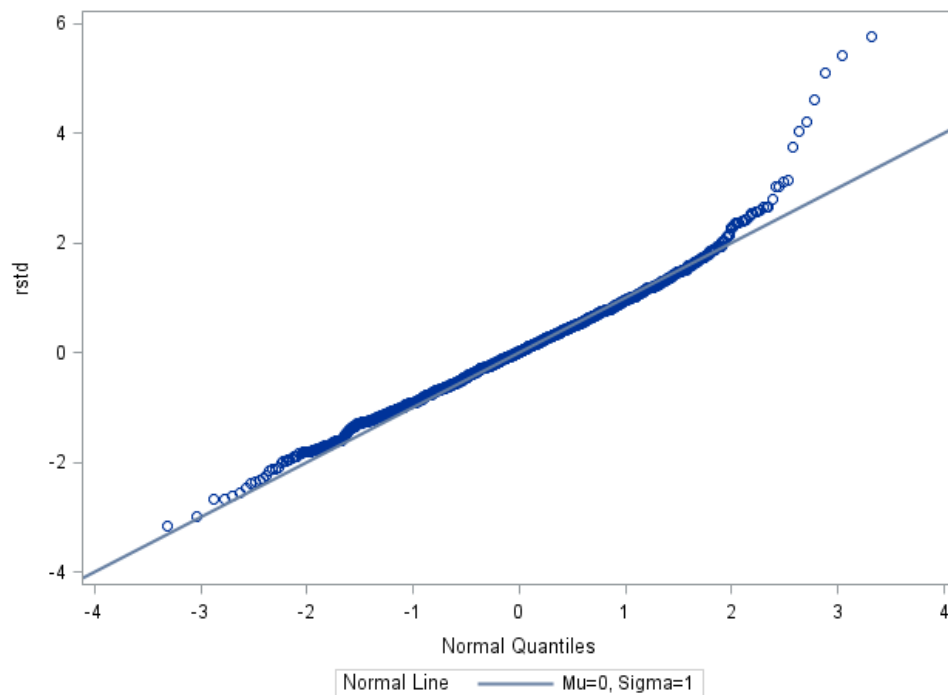


Figura 7 – Resíduos *studentizados* da altura total em papel normal de probabilidade.

4.3. Modelação da relação diâmetro-altura

As estatísticas de ajustamento e capacidade preditiva da função referente à relação diâmetro-altura na fase de regeneração encontram-se na Tabela 10, separadamente para o caso do ajustamento utilizando o conjunto total de dados e para o caso do conjunto de dados restritos a alturas entre os 1.5 m e os 3 m.

Tabela 10 – Estatísticas de ajustamento e capacidade preditiva da função linear para o crescimento da relação diâmetro-altura.

| Conjunto de dados de ajustamento | EF | MSE |
|----------------------------------|-------|-------|
| Total | 0.865 | 7.320 |
| Restrito | 0.446 | 3.910 |

EF – eficiência de modelação; MSE – erro quadrático médio ou Mean Square Error.

Na Tabela 11 apresentam-se as estatísticas de ajustamento e capacidade preditiva da função quando o parâmetro b é expresso em função das variáveis número de árvores por hectare ou índice de qualidade da estação. A introdução destas variáveis foi apenas considerada no caso do conjunto total de dados e revelou que a função que inclui ambas as variáveis é o que resulta nas melhores estatísticas de ajustamento, eficiência de modelação e erro quadrático médio.

Tabela 11 – Estatísticas de ajustamento da função para a relação diâmetro-altura expressas como combinações lineares de várias variáveis independentes.

| Função | EF | MSE |
|------------------------------------|-------|-------|
| $d = (b_0 + b_1N) (h-1.3)$ | 0.868 | 7.160 |
| $d = (b_0 + b_1SI) (h-1.3)$ | 0.874 | 6.830 |
| $d = (b_0 + b_1N + b_2SI) (h-1.3)$ | 0.880 | 6.490 |

EF – eficiência de modelação; MSE – erro quadrático médio ou Mean Square Error; d – diâmetro à altura do peito; N – número de árvores por hectare, SI – índice de qualidade da estação; b_0 , b_1 , b_2 – parâmetros.

Os valores dos parâmetros e as estatísticas associadas à significância da função da relação diâmetro-altura são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores dos parâmetros e estatísticas associadas à significância da função final para a modelação da relação diâmetro-altura.

| Parâmetro | Estimativa | Limite do intervalo de confiança a 95% | |
|-----------|------------|--|--------|
| b_0 | 9.208 | 8.638 | 9.778 |
| b_1 | - 0.001 | -0.002 | -0.001 |
| b_2 | -0.304 | -0.335 | -0.272 |

b_0, b_1, b_2 - parâmetros

Os valores das estatísticas de validação obtidos com resíduos *press* para esta função encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 – Estatísticas de validação da função seleccionada para a modelação da relação diâmetro-altura.

| EF | Mpr | Mapr | p5 | p95 |
|-------|-------|-------|--------|-------|
| 0.880 | 0.085 | 1.700 | -3.248 | 4.150 |

EF – eficiência de modelação; Mpr – média dos resíduos *press*; Mapr – média dos valores absolutos dos resíduos *press*; p5 – percentil 5; p95 – percentil 95;

Nas Figura 8 e Figura 9 apresenta-se o gráfico dos resíduos *studentizados* em função dos valores estimados de diâmetro e o gráfico dos resíduos *studentizados* em papel normal de probabilidade, respetivamente. Estes gráficos permitem observar a existência de homocedasticidade nas estimativas da função, no entanto, no que diz respeito à normalidade dos resíduos produzidos pela função esta não é verificada. Perante este resultado foi aplicado o método de Huber conforme descrito na secção 3.3.

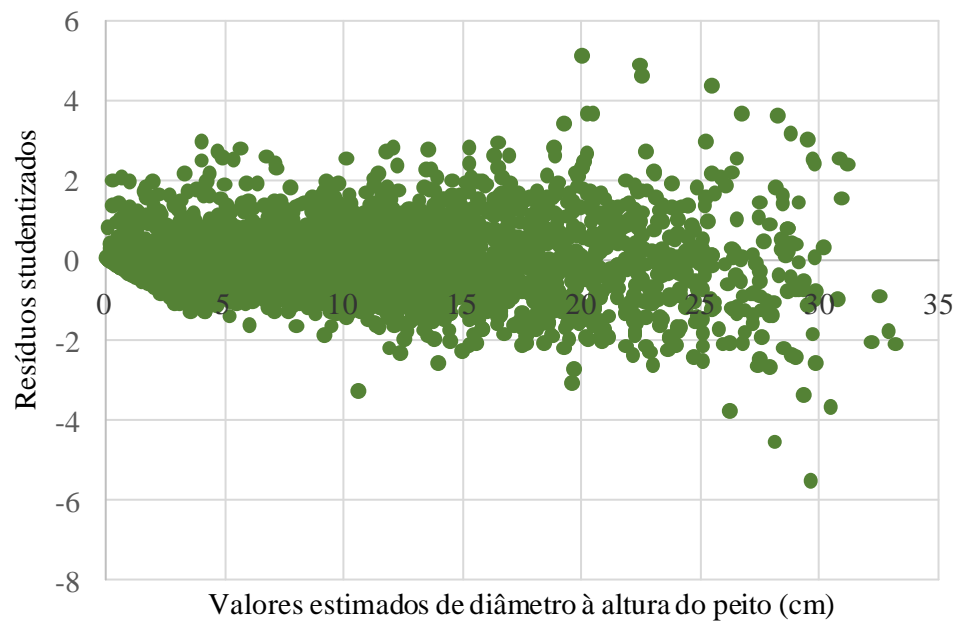


Figura 8 – Relação dos resíduos *studentizados* em função dos valores estimados de diâmetro à altura do peito.

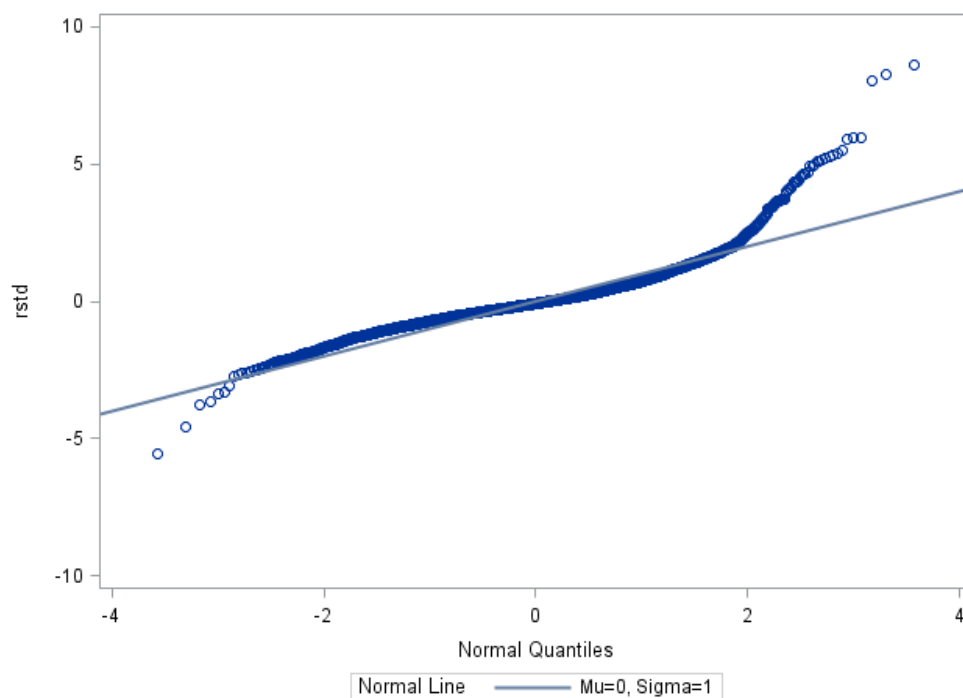


Figura 9 – Resíduos *studentizados* do diâmetro à altura do peito em papel normal de probabilidade.

As estimativas finais dos parâmetros e as estatísticas de validação, obtidos após a aplicação do método de Huber são apresentados nas Tabela 14 e Tabela 15. A comparação com os valores obtidos no ajustamento anterior (Tabela 12 e Tabela 13) mostra uma pequena variação dos valores dos parâmetros da função, mas uma melhoria das estatísticas de validação, principalmente através da diminuição da média dos valores absolutos dos resíduos *press* e do aumento do valor da eficiência de modelação.

Tabela 14 – Valores dos parâmetros e estatísticas associadas à significância da função final para a modelação da relação diâmetro-altura, após aplicação do método de Huber.

| Parâmetro | Estimativa | Limite do intervalo de confiança a 95% | |
|-----------|------------|--|--------|
| b_0 | 9.015 | 8.514 | 9.515 |
| b_1 | -0.001 | -0.002 | -0.001 |
| b_2 | -0.291 | -0.319 | -0.264 |

b_0, b_1, b_2 – parâmetros

Tabela 15 – Estatísticas de validação da função seleccionada para a modelação da relação diâmetro-altura, após aplicação do método de Huber.

| EF | Mpr | Mapr | p5 | p95 |
|-------|--------|-------|--------|-------|
| 0.973 | -0.084 | 0.709 | -1.556 | 1.229 |

EF – eficiência de modelação; Mpr – média dos resíduos *press*;

Mapr – média dos valores absolutos dos resíduos *press*; p5 – percentil 5; p95 – percentil 95;

Na Figura 10, apresenta-se o gráfico dos resíduos *studentizados* em papel normal de probabilidade, onde pode ser observada a normalidade dos resíduos produzidos pela função ajustada com recurso ao método de Huber. Desta forma, a função apresentada foi definida como a função final proposta para a modelação da relação diâmetro-altura.

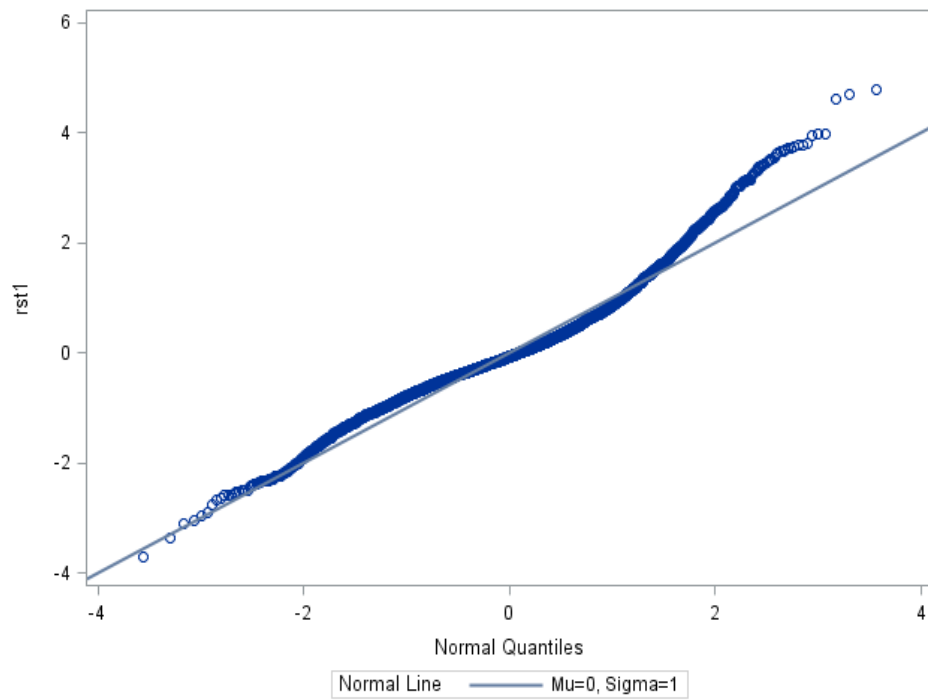


Figura 10 – Resíduos *studentizados* da relação diâmetro-altura em papel normal de probabilidade, obtidos pelo ajustamento com recurso ao método de Huber.

5. Conclusão

Com base num conjunto alargado de dados recolhidos e disponíveis para a presente tese, foram desenvolvidas duas funções: uma função de crescimento em altura total na fase de regeneração e outra para a predição da relação diâmetro-altura, ambos ao nível da árvore individual.

O primeiro, desenvolvido para a simulação da altura total da árvore, é baseado na função de crescimento potencial *versus* modificador e inclui o índice de competição expresso pela razão da altura total com altura dominante (h_1 / h_{dom1}). Esta foi a variável que traduziu melhor a alteração do potencial de crescimento das árvores, concluindo-se desta forma que a posição que a árvore ocupa dentro do povoamento influencia o desenvolvimento do crescimento em altura. A variável número de árvores por hectare não foi significativa em nenhuma das funções alternativas consideradas. Para os valores desta variável encontrados no conjunto de dados disponível (100 a 690 arv.ha⁻¹) a densidade dos povoamentos não está na fase de regeneração relacionada com o crescimento em altura das árvores.

A segunda função desenvolvida, formulada para a modelação da relação diâmetro-altura das árvores em fase juvenil, incluiu as variáveis índice de qualidade da estação e número de árvores por hectare. A significância da variável índice de qualidade da estação reflete a importância dos fatores edafoclimáticos. No que diz respeito à variável número de árvores por hectare, o valor do parâmetro que lhe está associado evidencia que os valores dos diâmetros à altura do peito são, nesta fase, influenciados pela densidade do povoamento.

As funções resultantes da presente tese, a incorporar no modelo SUBER, são apresentadas na Tabela 16.

A presente tese permitiu também a confirmação da adequação das regras de transição entre as fases de regeneração e juvenil das árvores no modelo SUBER.

Tabela 16 – Funções seleccionadas para a modelação do crescimento em altura e relação diâmetro-altura.

| Função | Parâmetro | Estimativa |
|--|-----------|------------|
| $h_2 = h_1 + ((h_{dom_2} - h_{dom_1})/int) * (1/(1 + \exp(-(a_0 + a_1 h_1/h_{dom_1}))))$ | a_0 | -0.528 |
| | a_1 | 4.527 |
| $d = (b_0 + b_1 N + b_2 SI) (h-1.3)$ | b_0 | 9.208 |
| | b_1 | -0.001 |
| | b_2 | -0.304 |

h_{dom_1} - altura dominante (m) da árvore no momento no ano $t=1$; h_{dom_2} - altura dominante (m) da árvore no momento no ano $t=2$; h_1 - altura total (m) no momento no ano $t = 1$; h_2 - altura total (m) no momento no ano $t = 2$; d - diâmetro à altura do peito (cm); N - número de árvores por hectare; SI - índice de qualidade da estação; int - intervalo de tempo entre medições (anos); a_0 , a_1 , b_0 , b_1 , b_2 - parâmetros.

6. Bibliografia

AFN. 2010. Inventário Florestal Nacional Portugal Continental IFN5, 2005-2006. Autoridade Florestal Nacional, Lisboa, 209 pp.

ALVES, A. A. M. 1988. Técnicas de Produção Florestal: Fundamentos, Tipificação e Métodos. Instituto Nacional de Investigação Científica. 2ª edição. Lisboa. 331 pp.

ALVES, A. M., CORREIA, A.V., PEREIRA, J.S. 2012. Silvicultura: A Gestão dos Ecossistemas Florestais. 1ª edição. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. 597 pp.

ARONSON, J., PEREIRA, J. S., PAUSAS, J. G. 2009. Cork Oak Woodlands on the Edge: Conservation, Adaptive Management and Restoration. Island Press. New York. 315 pp.

BURKHART, H., & TOMÉ, M. 2012. Modelling Forest Trees and Stands. Dordrecht: Springer Science + Business Media. New York. 457 pp.

CASTEL-BRANCO, D.A.A. 2014. Análise da Mortalidade em Plantações Jovens de Sobreiro (*Quercus suber* L.) e sua Relação com a Qualidade da Estação. Tese de Mestrado em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa. 53 pp. <http://hdl.handle.net/10400.5/7066>

COELHO, M. B., PAULO, J. A., PALMA, J. H. N., TOMÉ, M. 2012. Contribution of Cork Oak Plantations Installed After 1990 in Portugal to the Kyoto Commitments and to the Landowners Economy. Forest Policy and Economics 17: 59-68.

FAIAS, S. P., PALMA, J. H. N., BARREIRO, S.M., PAULO, J. A., TOMÉ, M. 2012. Resource Communication. sIMfLOR – Platform for the Portuguese Forest Simulators. Forest Systems 21(3): 543-548. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2012213-02951>.

HUBER, P.J. 1973. Robust Regression: Asymptotics, Conjectures, and Monte Carlo. *Annals of Statistics* 1: 799-821.

IUSS Working Group WRB 2006. World Reference Base for Soil Resources 2006. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103, FAO, Rome, 133 pp.

MYERS, R.H. 1990. Classical and Modern Regression with Applications. Second edition. Duxbury Classic Series. 357 pp.

NATIVIDADE, J. V. 1950. Subericultura. Ministério da Agricultura, Pescas e Alimentação. Direcção Geral das Florestas. Lisboa. 387 pp.

NUNES, L., TOMÉ, J., TOMÉ, M. 2011. Prediction of Annual Tree Growth and Survival for Thinned and Unthinned Even-Aged Maritime Pine Stands in Portugal From Data With Different Time Measurement Intervals. *Forest Ecology and Management* 262 (8): 1491–1499 doi:10.1016/j.foreco.2011.06.050

OLIVEIRA, A. C. 1998. Elementos de Apoio para a Disciplina de Silvicultura. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa. 57 pp.

PAULO, J. A. 2011. Desenvolvimento de um Sistema para Apoio à Gestão Sustentável de Montados de Sobro. Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia. Lisboa. 188 pp. <http://hdl.handle.net/10400.5/3850>

PAULO, J. A., TOMÉ, J., TOMÉ, M. 2011. Nonlinear Fixed and Random Generalized Height-Diameter Models for Portuguese Cork Oak Stands. *Annals of Forest Science* 68: 295 – 309. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s13595-011-0041-y>

PAULO, J. A., TOMÉ, M. 2014. Estimativa das Produções de Cortiça Virgem Resultantes de Desbastes em Montados de Sobro em Fase Juvenil. *Silvalusitana* 22(1): 29-42. <http://www.scielo.gpeari.mctes.pt/pdf/slu/v22n1/v22n1a02.pdf>

PAULO, J. A., FAIAS, S., GOMES, A. A., PALMA, J., TOMÉ, J., TOMÉ, M. 2015 Predicting Site Index from Climate and Soil Variables for Cork Oak (*Quercus suber* L.) Stands in Portugal. New Forests 46 (2): 293-307. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-014-9462-4>

RUIZ, A. P. 2005. Análise de um Ensaio de Desbastes em Montado de Sobro na Fase Juvenil Instalado em 1993. Relatório de Trabalho de Fim de Curso de Engenharia Florestal. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa. 50 pp.

SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M., TOMÉ, M., MONTERO, G. 2005. Modelling height and diameter growth of dominant cork oak trees in Spain. Ann. For. Sci. 62: 633 - 643.

SAS. 1989. SAS/STAT – User’s Guide. Versão 6. Vol. II. 4ªed. SAS Institute Inc. Cary, NC. USA.

SERRANO, T. A. 2007. Análisis de la Distribución de Alturas en Alcornoques en Fase de Regeneración. Tese de mestrado em Engenharia Florestal. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa.

SOARES, P. , TOMÉ, M., SKOVSGAARD, J.P., VANCLAY J.K. 1995. Evaluating a Growth Model for Forest Management Using Continuous Forest Inventory Data. Forest Ecology and Management. Volume 71, Issue 3, pp. 251-265. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037811279406105R>

TOMÉ, M. 2011. Apontamentos da Disciplina de Modelação dos Recursos Florestais. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa. <http://www.isa.utl.pt/def/files/files.2007/File/disciplinas/mrn/>

TOMÉ, M., BARREIRO, S., PAULO, J. A., TOMÉ, J. 2006. Modelling Tree and Stand Growth with Growth Functions Formulated as Age Independent Difference Equations. Canadian Journal of Forest Research; 36, 7:1621-1630. <http://dx.doi.org/10.1139/X06-065>

TOMÉ, M., COELHO, M. B., LOPES, F., PEREIRA, H. 1998. Modelo de Produção para o Montado de Sobro em Portugal. In: H. Pereira (ed), Cork Oak and Cork, European Conference on cork-oak and cork, Lisboa, Portugal, pp. 22-46.

TOMÉ, M., COELHO, M. B., LOPES, F., PEREIRA, H. 1999. A Management Oriented Growth and Yield Model for Cork Oak Stands in Portugal. In: A. Amaro e M. Tomé (Eds), Empirical and Process-Based Models for Forest Tree and Stand Growth Simulation, Edições Salamandra, Novas Tecnologias, Lisboa, Portugal, pp. 271-289.

VANCLAY, J. K. 1995. Growth Models for Tropical Forests: A Synthesis of Models and Methods. For. Sci. 41: 7 – 42.